



# Источники Отрицательных ионов

Лекции для аспирантов ИЯФ - 2016

## Лекции 1-2

- Отрицательные ионы, их свойства и применения
- Механизмы образования ОИ
- Основные разновидности источников ОИ
- Процессы генерации ОИ на поверхности

## Лекции 3-4

- Поверхностно-плазменный механизм генерации ОИ
- ППИ для ускорителей
- Работы по источникам отрицательных ионов для УТС

# Сродство атомов к электрону

(«устойчивость» отрицательных ионов)

H <sup>-</sup>	0,75421
He <sup>-</sup>	0,077
B <sup>-</sup>	0,28
C <sup>-</sup>	1,263( <sup>4</sup> S) 0,035( <sup>2</sup> D)
O <sup>-</sup>	1,46112
N <sup>-</sup>	- 0.07
F <sup>-</sup>	3,4
Cs <sup>-</sup>	0,47

Дополнительный электрон слабо связан с атомом водорода

# “Полезные” свойства ОИ

## 1. Отрицательные ионы легко теряют свой заряд

- Перезарядный метод управления потоками частиц в ускорительной технике
- Ионная литография в пучковых технологиях

## 2. Образование отрицательных ионов в газах снижает проводимость газа и препятствует развитию электронных лавин - газовая электроизоляция ( $\text{SF}_6$ )

## 3. Не все атомы образуют отрицательные ионы – Accelerator mass-spectroscopy

## 4. Заряд диэлектрика при бомбардировке отрицательными ионами компенсируется уходом вторичных электронов –

имплантация и обработка диэлектриков, ВИМС диэлектриков

# I. Отрицательные ионы в ускорителях частиц

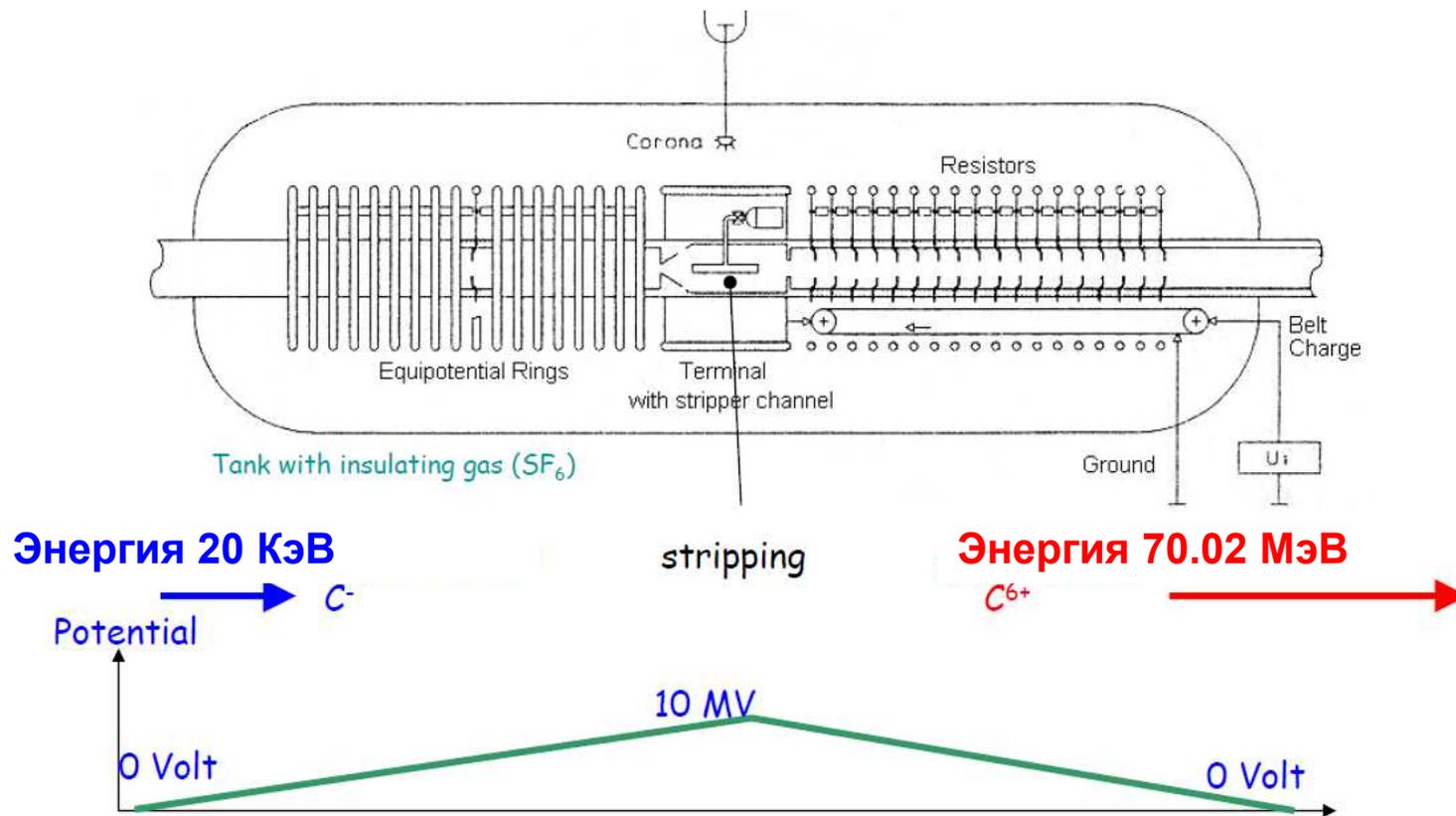
**Перезарядный метод управления потоками частиц:**

**Отрицательные ионы ускоряются  
и перезаряжаются в атомы и положительные ионы в обдирочной мишени**

1. **Тандемные ускорители** – удвоение (умножение) энергии частиц
2. **Перезарядная инжекция ОИ** – 100% заполнение дорожки накопителя, обход теоремы Лиувилля
3. **Ускорение ОИ в циклотронах** – непрерывный вывод частиц, в т.ч. нескольким потребителям
4. **Линейные ускорители** – ускорение ОИ на обратном полупериоде волны клистронов
5. **Обдирка ускоренных ОИ** – остронаправленные пучки; инжекторы нейтралов

# Тандемный электростатический ускоритель

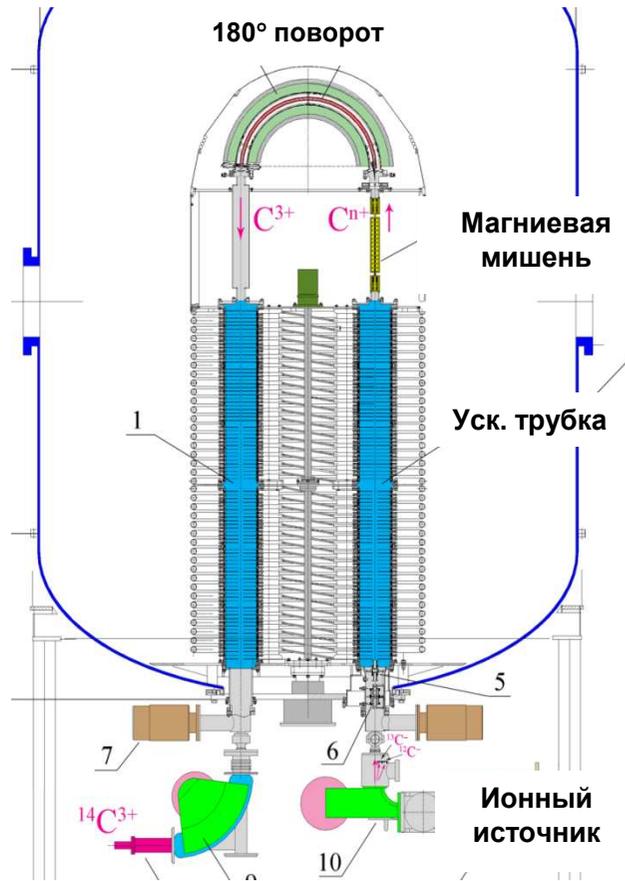
**Удвоение энергии для ионов  $H^-$**  ( $\times N$  для многозарядных ионов)  
**Обдирка ускоренных ОИ на ВВ потенциале**- инжектор на потенциале земли!



**Pelletron – зарядка с помощью pellet chain (вместо ремня)**

# Тандемы ИЯФ

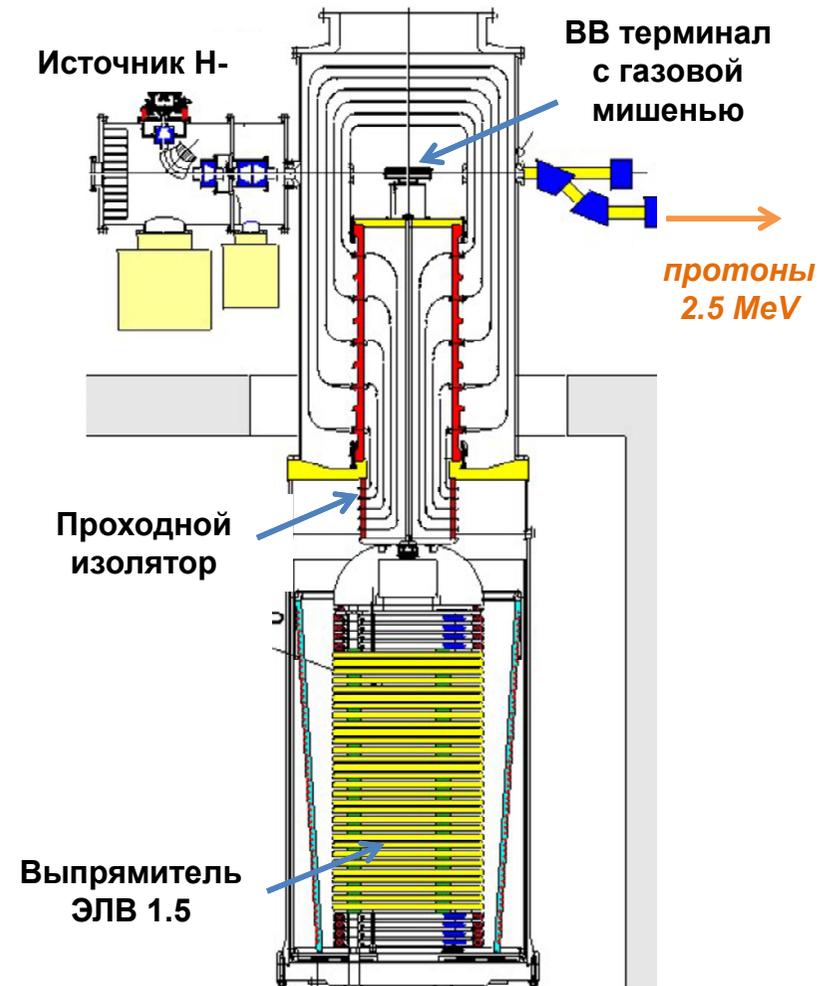
Ускорительный спектрометр (AMS)  
Тандем с ускоряющим напряжением 2 МВ



Использует отрицательные ионы  $^{14}\text{C}^-$ ,  
т.к.  $^{14}\text{N}$  не образует ОИ

Более 40 AMS установок

Тандем с вакуумной изоляцией для БНЗТ  
с ускоряющим напряжением 1.2 МВ

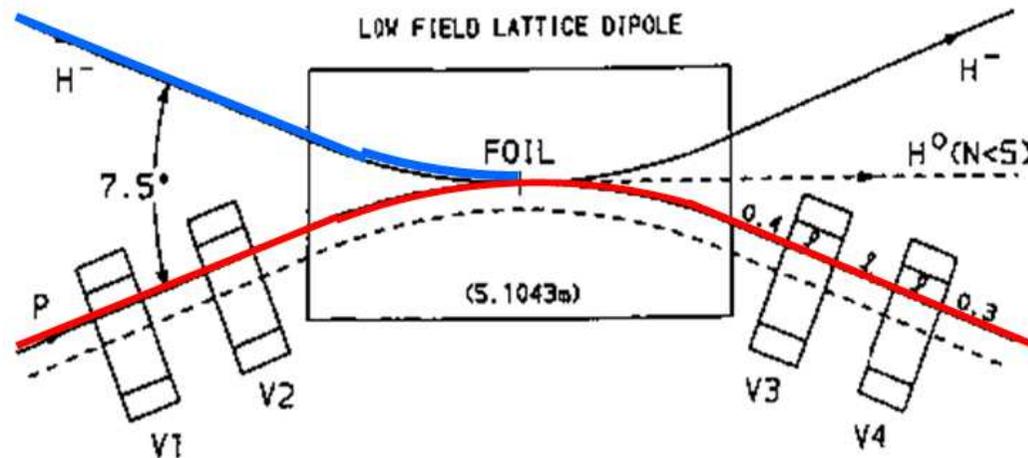


# Перезарядная инжекция ионов H-



Г.И. Димов

метод разработан в ИЯФ (1962-70 г.) под руководством Г.И. Димова



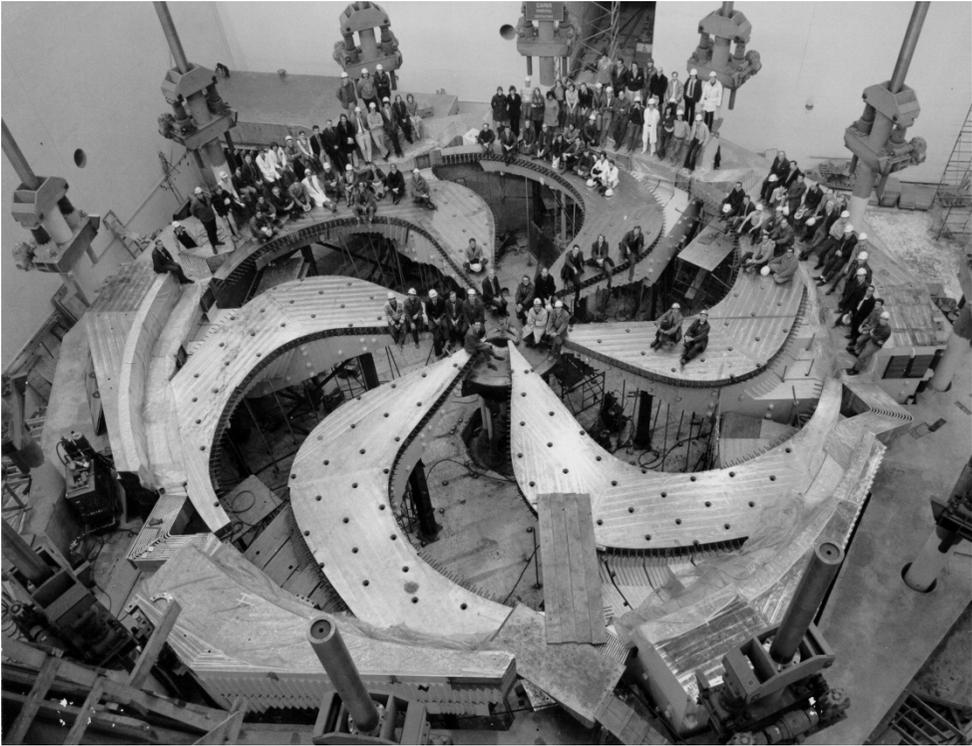
Используется на крупнейших протонных ускорителях:

1. Fermi National Laboratory, Brookhaven National Lab – Alternating Gradient Synchrotron,
2. Argonne National laboratory– Intense Pulsed Neutron Source ,
3. Oak Ridge National Laboratory– US Spallation Neutron Source,
4. Los Alamos National Laboratory – LA Neutron Science Center
5. Japanese Proton Accelerator Research Complex (J-PARC),
6. DESY - Deutsches Elektronen synchrotron,
7. Rutherford-Appleton Laboratory (ISIS)
8. В ЦЕРНе для LHC разрабатывается LINAC4 с инжекцией ионов H- (с участием ИЯФ)

**Пример перезарядной инжекции в синхротроне ISIS (RAL, Oxford)**

Пучок ионов H- обдирается в 0.3  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  фольге. За 130 оборотов в кольцо инжектируется  $\sim 2.8 \times 10^{13}$  протонов. ВЧ система формирует сгустки (bunches) и ускоряет их до 800 MeV с темпом ускорения 140 kV за один оборот. Средний ток протонов на нейтронно-образующей мишени  $\sim 200 \mu\text{A}$  (4  $\mu\text{C}$  at 50 Hz).

# Вывод ускоренных частиц из циклотронов



500 MeV main cyclotron at TRIUMF

# Мощные источники для инжекторов нейтралов УТС



Пучки нейтралов мощностью **16 MW** (**180 keV**) используются в стеллараторе LHD для нагрева плазмы

## II. Источники отрицательных ионов

Специфика источников ОИ, или чем они отличаются от источников ПИ

1. Отрицательные ионы легко теряют свой электрон, в т.ч. в плотной плазме и на вытекающем рабочем газе! Это ограничивает рабочее давление газа в источнике и повышает требования к вакуумным условиям в источнике
2. Вместе с отрицательными ионами вытягиваются электроны (если не принимать спец. меры, потоки электронов могут в  $\sim 10^3$  раз больше, чем потоки ОИ)
3. Ускоряемые ОИ разрушаются на сопутствующем газе и образуют быстрые нейтралы (и вторичные электроны), которые могут нарушать работу источника и ускорителя.
4. Ионизация сопутствующего газа формируемым пучком ОИ и электронов приводит к появлению и ускорению встречных положительных ионов
5. Компенсация пространственного заряда пучка ОИ осуществляется вторичными положительными ионами, которые из-за низкой подвижности легче удерживаются в области пучка.

# Характеристики ионных источников

**Ток и энергия пучка.** Массовый состав (примеси). Стабильность

Длительность импульса и частота повторения импульсов.

Поперечные размеры, угловая расходимость. Разброс по энергиям.

Поперечный эмиттанс  $\epsilon$  - площадь на фазовой плоскости для 95% пучка. Выражают в  $\pi$  **cm mrad**

Нормализованный (инвариантный) эмиттанс  $\epsilon_n = \gamma \cdot \beta \cdot \epsilon$   $\epsilon_n = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$

Первеанс  $I / U^{3/2}$

Нормализованный первеанс  $\Pi = I / I_0$ , где  $I_0 = (0.17 U^{3/2} / d^2) \cdot (a \cdot d)$

Энергетическая эффективность получения иона (эВ/ион или А/кВт)

Газовая эффективность получения иона (мол/ион)

Размеры источника и его систем питания

**Для источников ОИ важными являются :**

Сопутствующий поток электронов

Поток газа из источника (возможность транспортировки пучка)

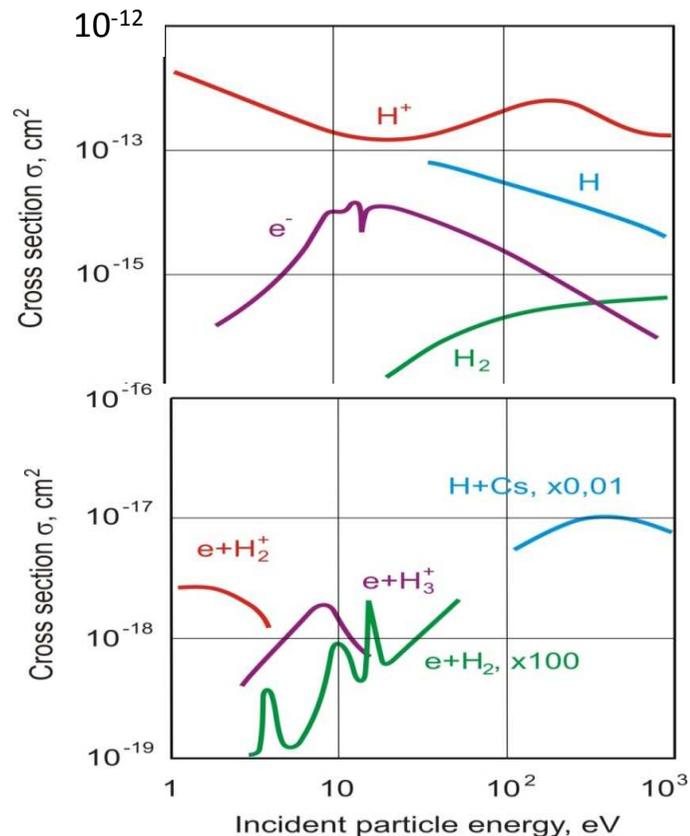
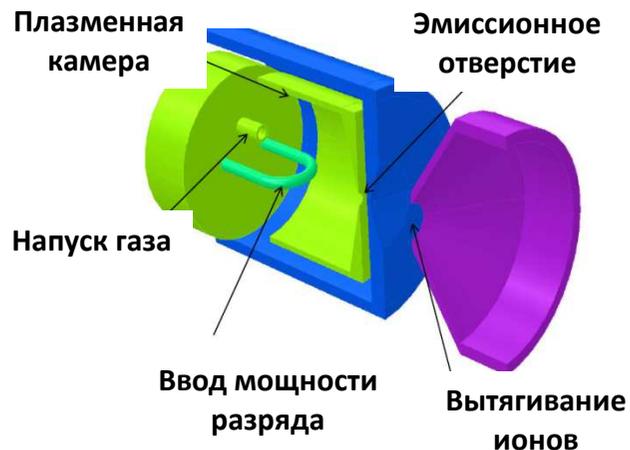
# Классификация источников ОИ

По способу образования ионов

1. Плазменные (объемные)
2. Перезарядные
3. Поверхностные:
  - термоэмиссионные
  - с неравновесной кинетической эмиссией
4. Поверхностно-плазменные

# 1. Плазменные (объемные) источники

## Схема плазменного источника



Сечения разрушения ионов H-

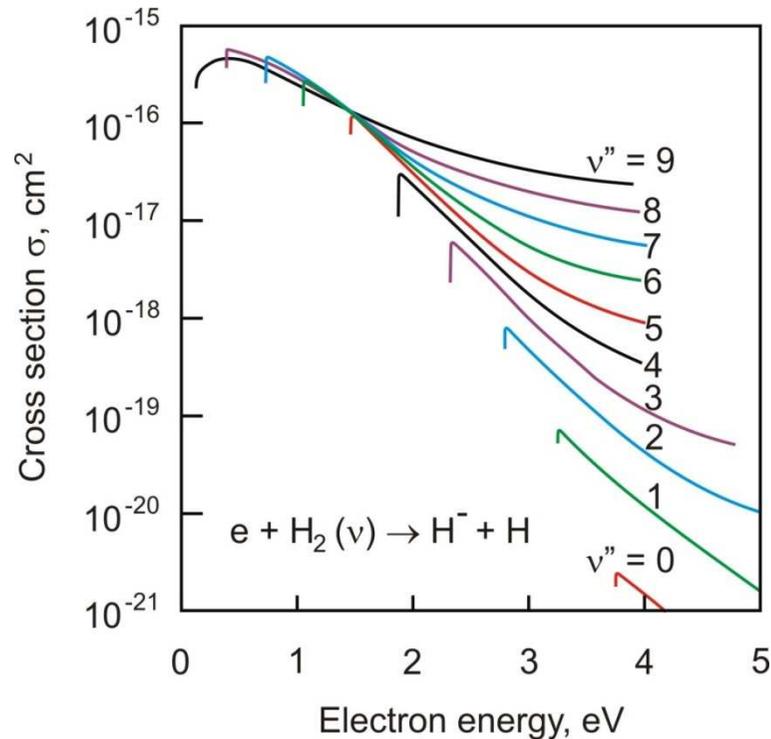
Сечения образования ионов H-

$e + H_i^+$  - двухступенчатые процессы!

Сечения образования ионов H<sup>-</sup> в объеме газоразрядной плазмы (при энергии 1-100 эВ) на 4-5 порядков ниже, чем сечение их разрушения

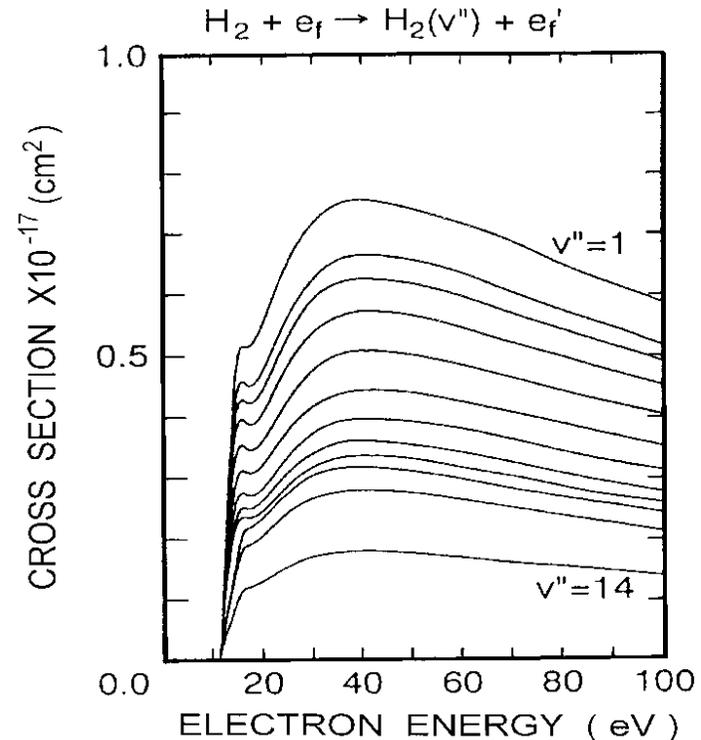
Из объемных источников вытягиваются ОИ, образованные на периферии плазмы

# Усиление объемного образования ионов Н- за счет колебательного возбуждения молекул



Образование отрицательных ионов Н- из колебательно-возбужденных молекул

Нужны холодные электроны



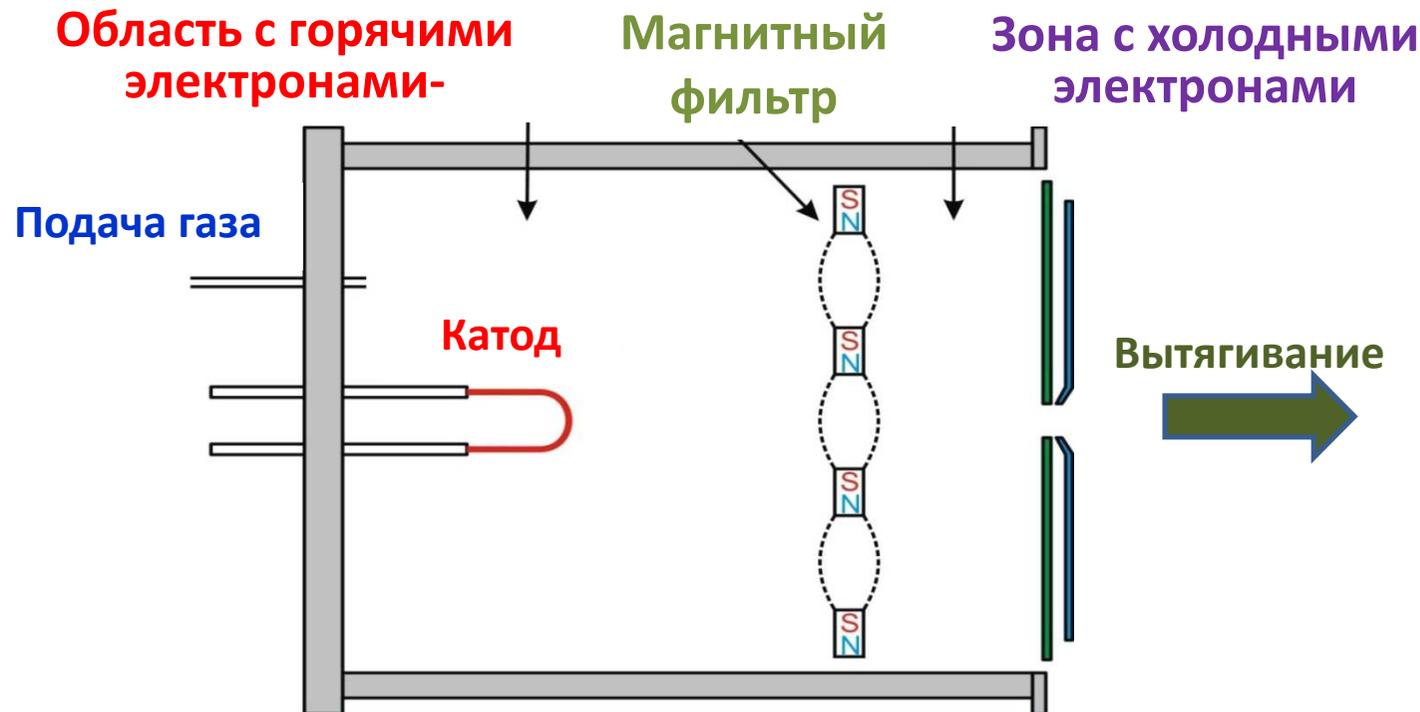
Колебательное возбуждение молекул Н<sub>2</sub> электронами

Нужны электроны с энергией >15 эВ

Двухступенчатый процесс  $e + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v)$  и  $e + \text{H}_2(v) \rightarrow \text{H}^-$  удастся реализовать в тандемных объемных источниках ОИ

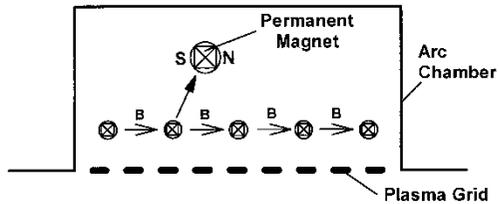
# Тандемные источники

ОИ образуются из колебательно-возбужденных молекул водорода.

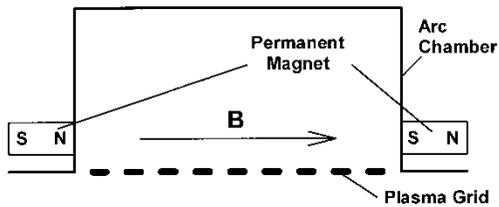


Магнитный фильтр не пропускает горячие электроны в зону генерации ОИ:  
кулоновское рассеяние  $\sigma \sim E^{-2}$

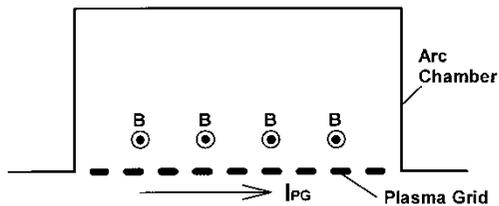
# Разновидности Магнитных фильтров



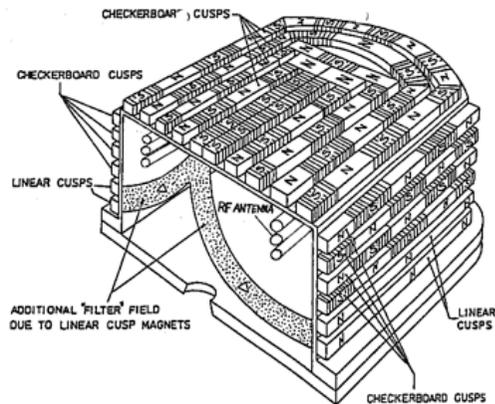
**Стержневой (rod)** - постоянные магниты



**Внешний (external)** - постоянные магниты

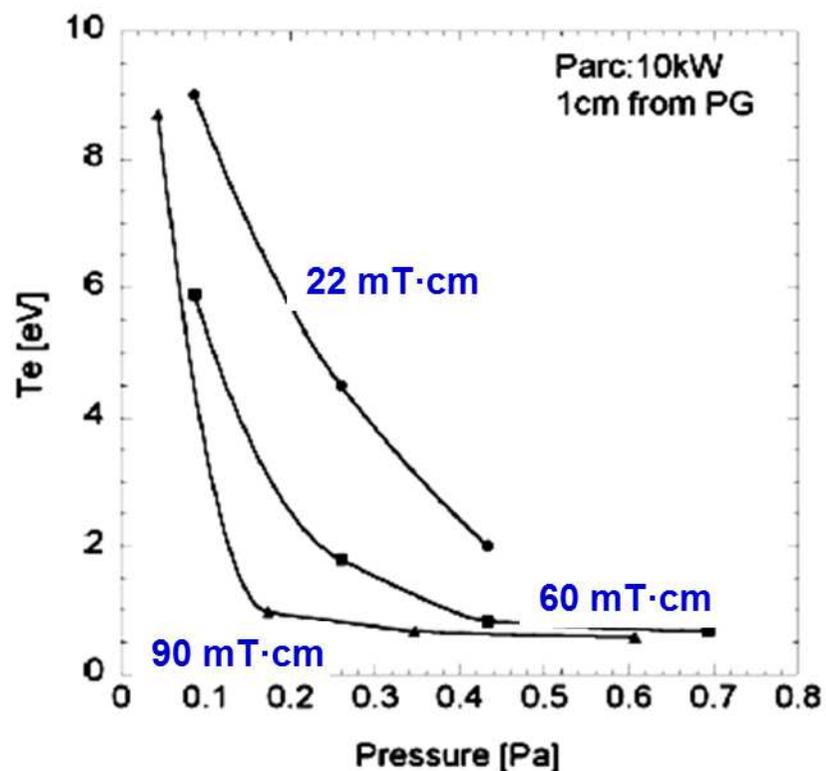


**Токовый** - пропускание тока  $I_{PG}$  через пластины в плазменном электроде



**Зонтик (tent)** - постоянные магниты

# Свойства магнитного фильтра

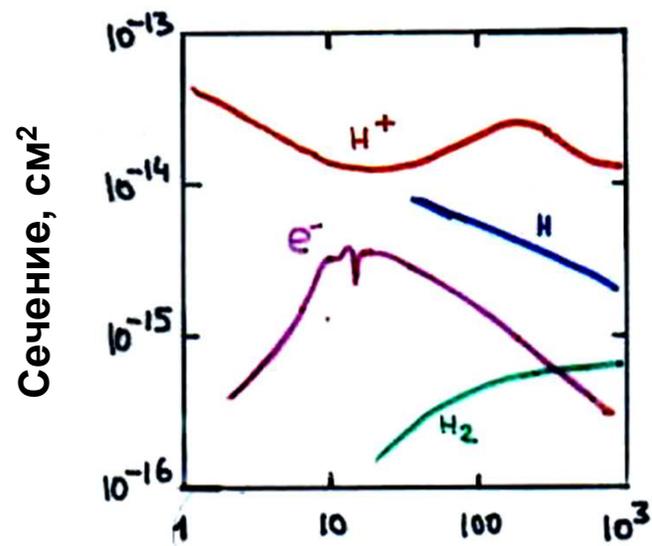


Температура электронов вблизи PG снижается до ~ 1 эВ при усилении МФ и увеличении подачи H<sub>2</sub>

Разряд с фильтром 90 мТ·см работает при пониженном давлении 0.1 Па!

Длина пробега иона H<sup>-</sup> до разрушения электронами увеличивается **на порядок** при снижении T<sub>e</sub> с 5 до 1 эВ

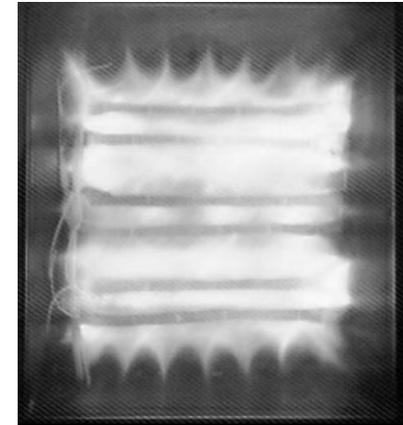
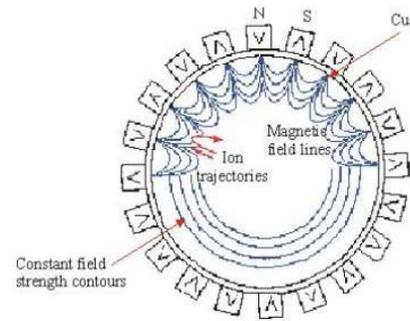
$$\lambda_{H^-} = \frac{V_{H^-}}{n_e \langle \sigma_e v_e \rangle}$$



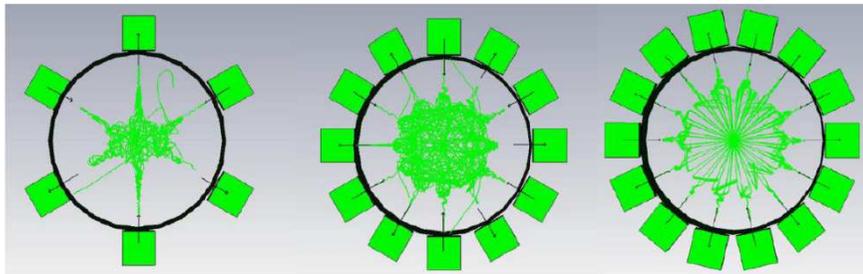
# Multicusp для удержания плазмы

1973 Limpaecher & MacKenzie at UCLA build a 86 liter plasma vessel with 1252 alternating Alnico bar magnets lining the walls. Plasma is very quiescent; RSI 44, 1973, 726

1979 Ehlers and Leung at LBNL start to develop multicusp ion sources for hydrogen and later for negative ions.

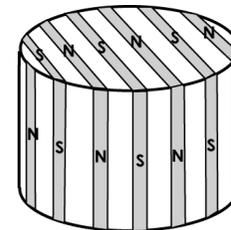


6 темных полос –  
ВЧ антенны

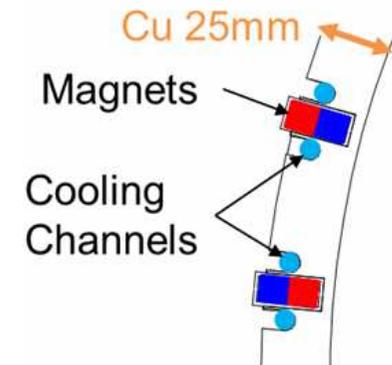
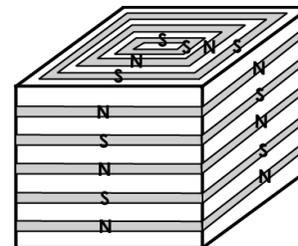


Mean life of electrons(s)	Sum of electron trajectory (m)	Number
$7.06e-7$	29,453	4
$1.47e-6$	61,641	6
$5.51e-6$	231,440	8
$7.8e-6$	328,062	10
$8.79e-6$	368,032	12
$7.01e-6$	294,260	14

line-cusp axial

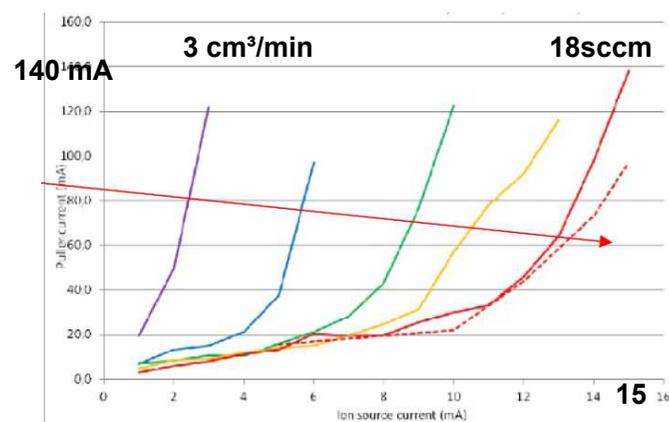
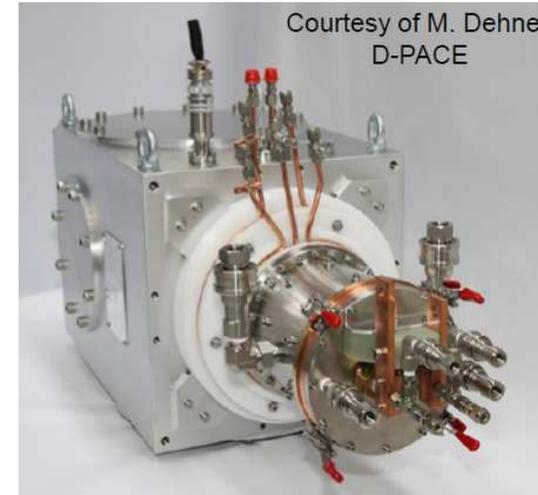
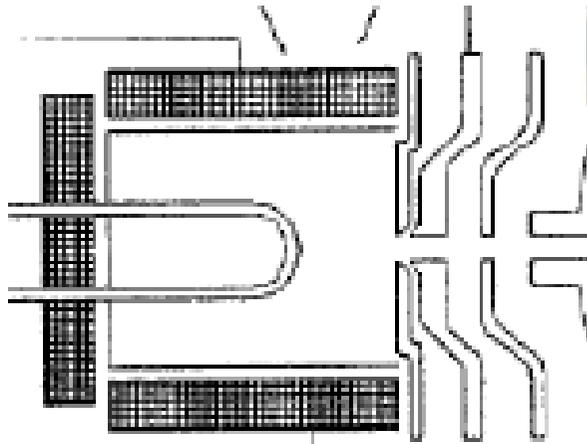


line-cusp azimuthal



# 15 mA dc объемный источник LBL – TRIUMF - D-PACE

Впервые создан в LBL в 1983, детально исследован в TRIUMF (Канада)  
С накаливаемым катодом и удержанием плазмы периферийным магнитным мультиполем  
Серийно производится фирмой D-PACE



<b>Beam Current:</b>	<b>15 mA continuous</b>
<b>Ion Energy:</b>	<b>20-30 kV</b>
<b>Filament:</b>	<b>340 A, 3.5 V; 1.2 kW</b>
<b>Arc supply:</b>	<b>29 A, 120 V; 3.5 kW</b>
<b><math>\epsilon_{rms, norm}</math></b>	<b><math>\sim 0.22 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}</math></b>
<b>Plasma lens</b>	<b>30 A, 10 V; 0.3 kW</b>
<b>Efficiency:</b>	<b><math>\sim 3 \text{ mA} / \text{kW}</math></b>
<b>Filament lifetime:</b>	<b><math>\geq 14</math> days at peak current</b>

# Генерация плазмы в объемных источниках ОИ



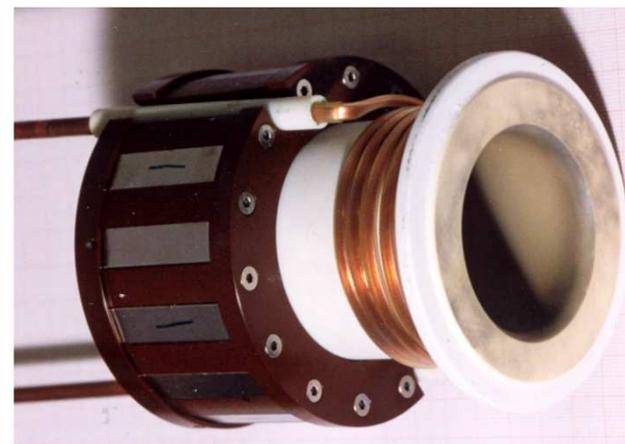
Накаливаемые катоды W, Ta, LaB<sub>6</sub>



Внутренняя ВЧ антенна  
с фарфоровым покрытием



ЭЦР ввод

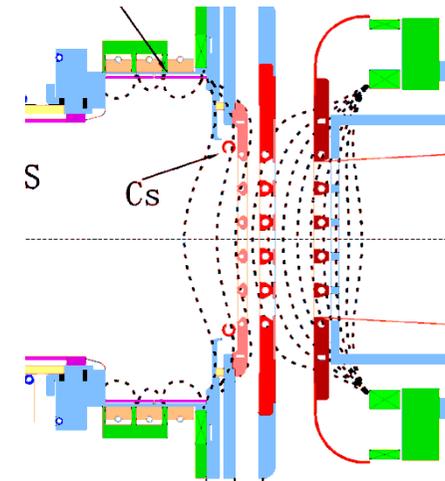
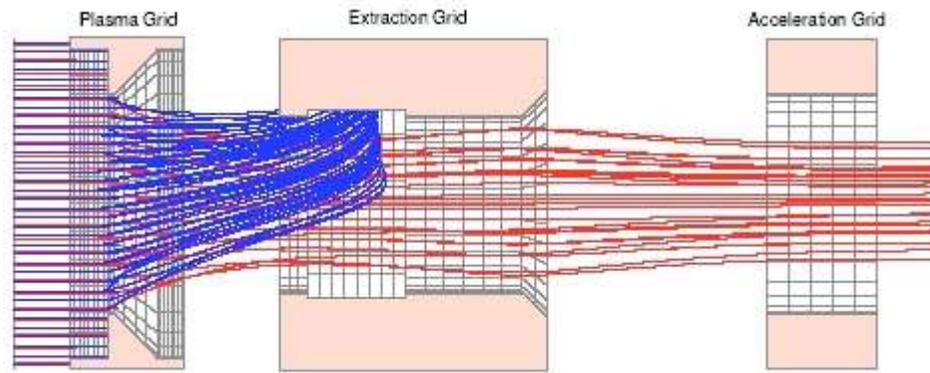


Внешняя ВЧ антенна

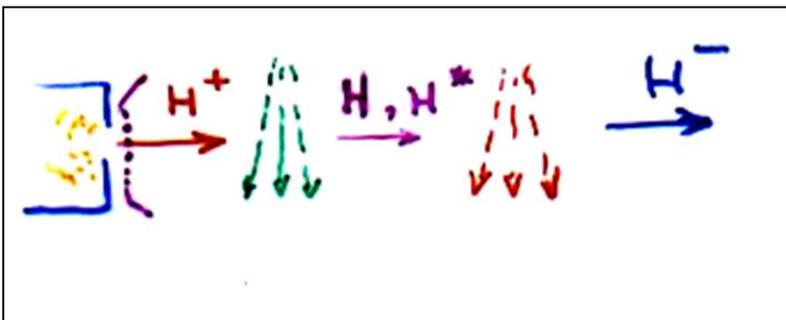
# Вытягивание отрицательных ионов из плазменных источников

## 3-4 электродная многоапертурная оптика

1. Для отклонения электронов накладывается поперечное магнитное поле
2. Электроны перехватываются в специальные ловушки на низкий потенциал
3. В современных источниках соотношение ионы  $\text{H}^- : e = 2 : 1$



## 2. Перезарядные источники ОИ



Перезарядные мишени:

Фольги, Газовые, Пароструйные, Плазменные

Соотношение сечений перезарядки для водорода с энергией 1-10 кэВ

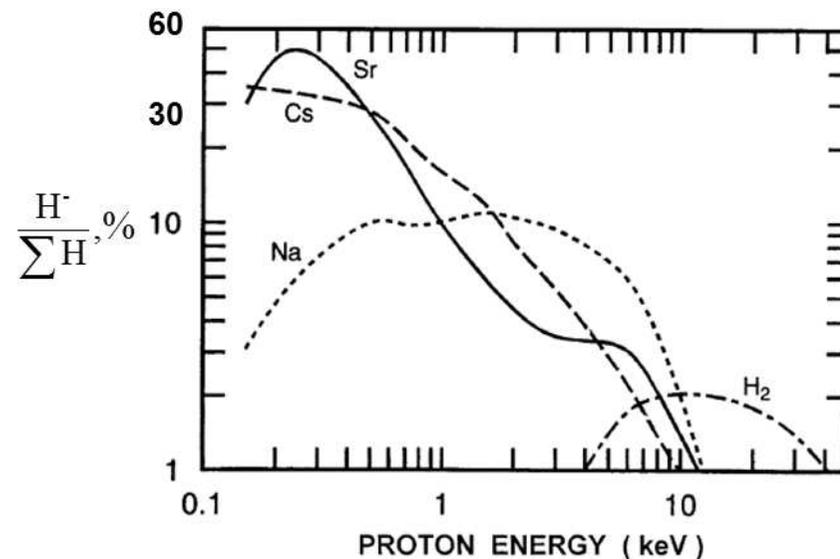
$$\sigma_{-0} \approx \sigma_{+0} > \sigma_{0+} > \sigma_{-+} > \sigma_{0-} > \sigma_{+-}$$

Равновесный выход ионов H-

В первом приближении

$$F_{\infty}^{-} = \frac{I(H^{-})}{I_0(H^{+})} \approx \frac{\sigma_{0-}}{\sigma_{-0} + \sigma_{0-}}$$

# Равновесный выход ионов H<sup>-</sup> при перезарядке протонов



мишень	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub> O	Na	Mg	Cs	Sr
F <sup>-</sup> , %	2	1.4	1.8	5.5	4.6	12	18	35	50
E <sub>опт</sub> , кэВ	13	12	6	2	8	2-3	0.4	0.2	0.25

При перезарядке первичные ионы H<sub>2</sub><sup>+</sup> и H<sub>3</sub><sup>+</sup> разваливаются на 2 (3) осколка:

-выход отрицательных ионов в 2 (3) раза выше

-энергия осколков ниже: E<sub>0</sub>/2 и E<sub>0</sub>/3

Для увеличения тока пучка при перезарядке важен фактор  
(для H<sup>+</sup> на Na оптимальная энергия ионов U= 10 кВ)

$$F^- \cdot U^{3/2}$$

# Коммерческие перезарядные источники ОИ

NEC (National Electrostatic Corporation)



**С ВЧ генератором плазмы -**

4 мкА ионов He<sup>-</sup>

Прост, компактен, с большим ресурсом работы

Установлен на ~90 тандемных ускорителях

**С дуговым генератором плазмы - Ток пучка He- до 30 мкА**

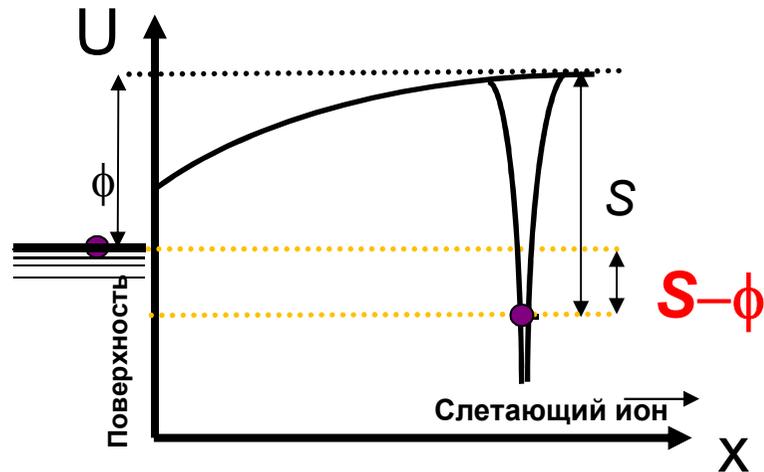
ARC V/A	Filament A/V	Extractor kV	Focus kV	Rb Oven °C	Pressure @ source (TORR)	Beam Current μA
104/6.7	83/12.7	6.4	8.7	230	2.6x10 <sup>-5</sup>	31.4 He <sup>-</sup>
93/6.6	85/13.7	2.1	17	N/A	3.2x10 <sup>-5</sup>	223 H <sup>-</sup>

## 3. Поверхностные источники ОИ

- **Термоэмиссионные** — за счет термодесорбции
- **С кинетической эмиссией**  
распылительные,  
с отражением частиц с перезарядкой

# Термоэмиссия отрицательных ионов

Эффективна для ОИ с большим сродством к электрону  $S > \phi$



Энергия десорбции атома D.

У отрицательного иона с большим сродством к электрону  $S > \phi$  энергия десорбции на величину  $(S - \phi)$  меньше, чем у атома, т.к. электрон из металла опускается на уровень сродства

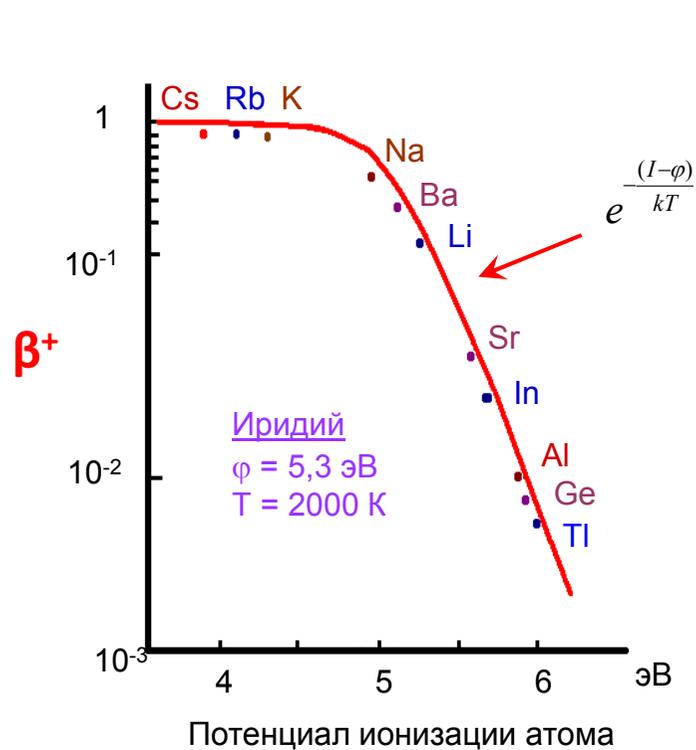
Схема термодесорбции отрицательного иона

Коэффициент ионизации при термодинамическом равновесии  $\alpha$  - формула Саха-Ленгмюра

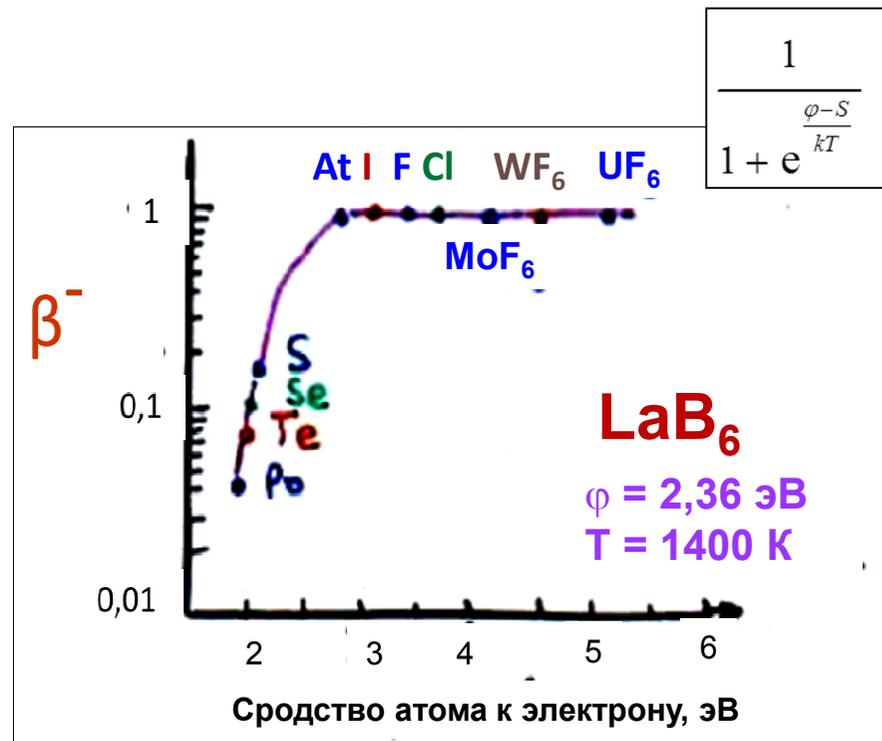
$$\alpha = \frac{J^-}{J_0} = \frac{g^- \exp\left\{-\frac{D + (\phi - S)}{kT}\right\}}{g_0 \exp\left\{-\frac{D}{kT}\right\}} = \frac{g^-}{g_0} \exp\left\{\frac{S - \phi}{kT}\right\}$$

Степень отрицательной ионизации  $\beta^- = \frac{\alpha}{1 + \alpha} = \frac{1}{1 + k \cdot \exp\left(-\frac{S - \phi}{kT}\right)}$

# Степень ионизации при термоэмиссии



**Положительная ионизация**  
**Нужны эмиттеры с  $\varphi > I$**

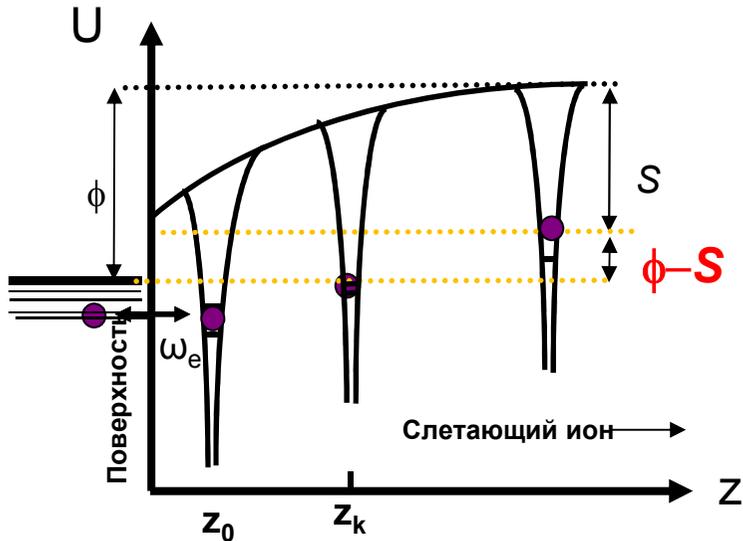


**Отрицательная ионизация**  
**Нужны эмиттеры с  $S > \varphi$**



# Кинетическая эмиссия ОИ ( $\phi > S$ !)

## Вероятностная модель



Вероятность захватить электрон при удалении иона от  $Z_0$  до  $Z_k$

$$P_{0-} = \int_{z_0}^{z_k} \omega_e dt = \int_{z_0}^{z_k} \omega_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right) \cdot \frac{dz}{v_{\perp}} \cong \frac{\lambda}{v_{\perp}} (\omega_0 - \omega_k)$$

Вероятность потери электрона при удалении от  $Z_k$  на бесконечность

$$P_{-0} = \int_{z_k}^{\infty} \omega_e dt = \int_{z_k}^{\infty} \omega_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right) \cdot \frac{dz}{v_{\perp}} \cong \omega_k \frac{\lambda}{v_{\perp}}$$

Значения  $\omega_0$ ,  $\omega_e(z)$ ,  $\lambda$  зависят от  $S$ ,  $\phi$ .

Для отрицательного иона  $H^-$  на  $W+Cs$ :  $Z_0 = 5 a_0$ ,  $\lambda \sim 2 a_0$ ,  $\omega_0 \sim 8 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$

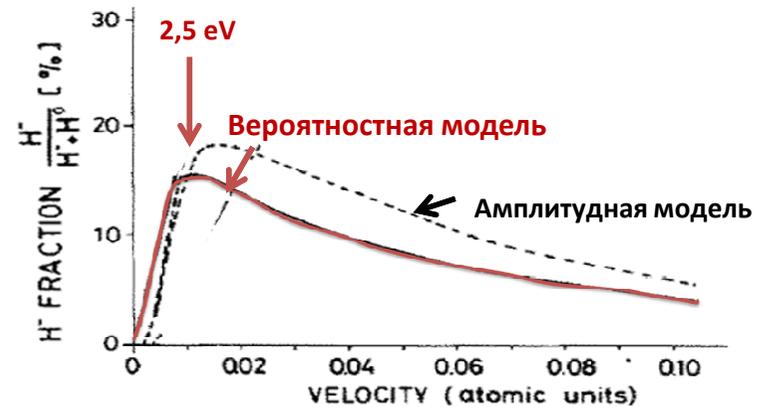
для иона с энергией 2.5 эВ ( $V_{\text{удал}} \sim 2.2 \cdot 10^6 \text{ cm/c}$ )

вероятность захвата электрона  $P_{0-} \sim 1$  ( $\lambda \omega_0 / V_{\text{удал}} \sim 4$ ),

вероятность не потерять электрон  $(1 - P_{-0}) \sim 0.7$  (при  $Z_k = 10a_0$ ,  $\omega_k \sim 7 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ )

Степень отрицательной ионизации - произведение вероятностей захвата вблизи поверхности и вероятности не потерять электрон при удалении

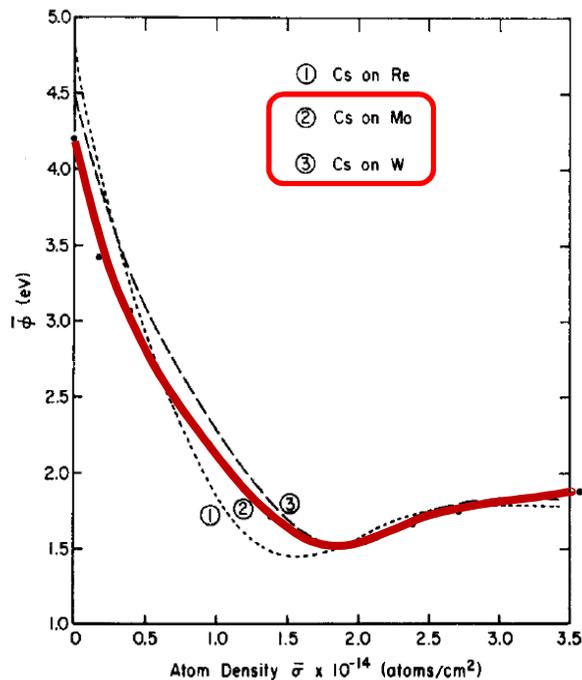
$$\alpha^- = P_{0-} (1 - P_{-0}) \approx \frac{1}{v_{\perp}} \cdot \exp\left(-\frac{\phi - S}{\alpha v_{\perp}}\right)$$



Похоже на формулу Саха-Ленгмюра, но вместо  $kT$  стоит  $V_{\text{удал}}$   
Возможно образование ОИ в условиях  $\phi > S$ , но лучше  $\phi$  понижать.

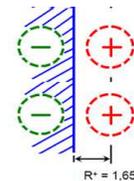
# Снижение работы выхода поверхности при адсорбции Cs

Адсорбция цезия на тугоплавких металлах снижает работу выхода до  $\phi \sim 1.5$  эВ



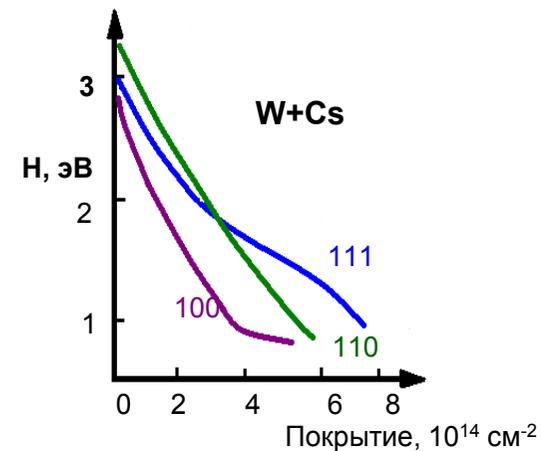
Оптимальное покрытие  $\theta \sim 0.7$  содержит всего  $\sim 2 \cdot 10^{14}$  атомов/см<sup>2</sup>  $\sim 0.5 \cdot 10^{-8}$  г/см цезия

Снижение приповерхностного барьера полем дипольного слоя



$$\Delta\phi = E \cdot R^+ = -4\pi\sigma \cdot R^+ = -4\pi e N \cdot R^+$$

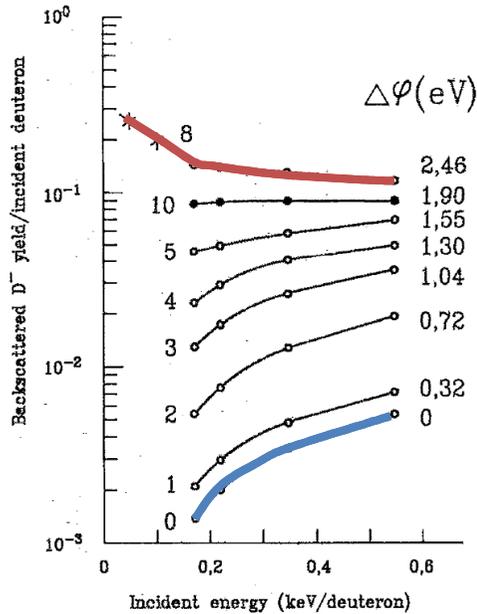
Ионы цезия при адсорбции создают **дипольный слой**, пропорциональный количеству Cs (для покрытий  $\theta < 0.7$ )



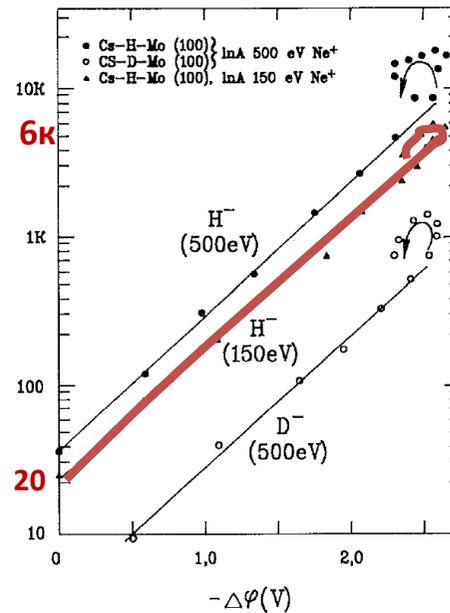
Теплота десорбции Cs из монослойного покрытия  $H=1.5$  эВ

Сильная полярная связь,  $\sim 80\%$  от общей  
 При увеличении покрытия она уменьшается

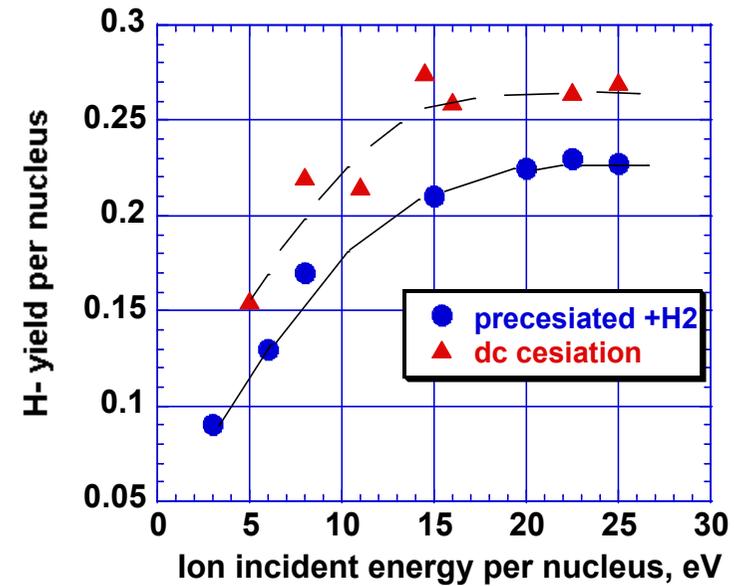
# Адсорбция цезия усиливает кинетическую эмиссию ионов H-



**Отражение дейтерия в виде  $D^-$  возрастает в десятки раз при адсорбции Cs**

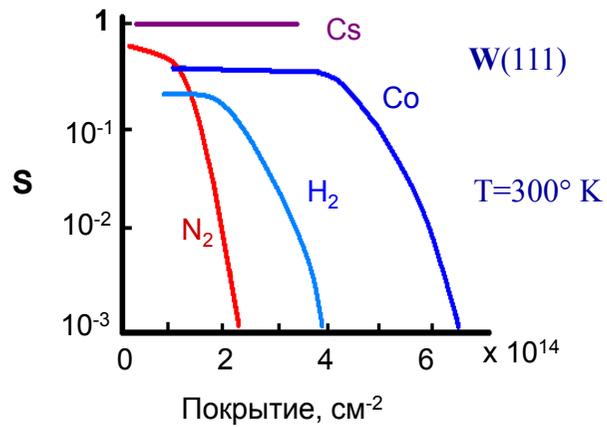


**Десорбция ионов  $H^-$  и  $D^-$  при бомбардировке ионами возрастает в сотни раз при адсорбции Cs**

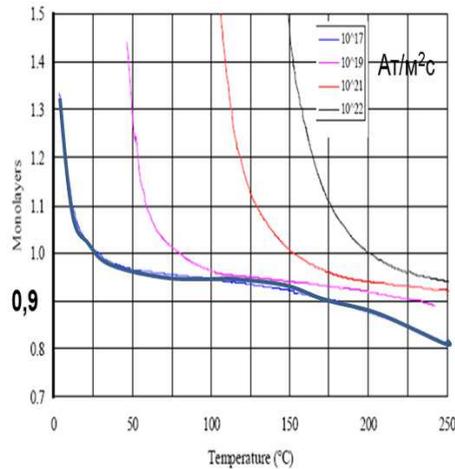


**Коэффициент конверсии атомов/ионов водорода в ионы H- на поверхности Mo +Cs достигает ~25%**

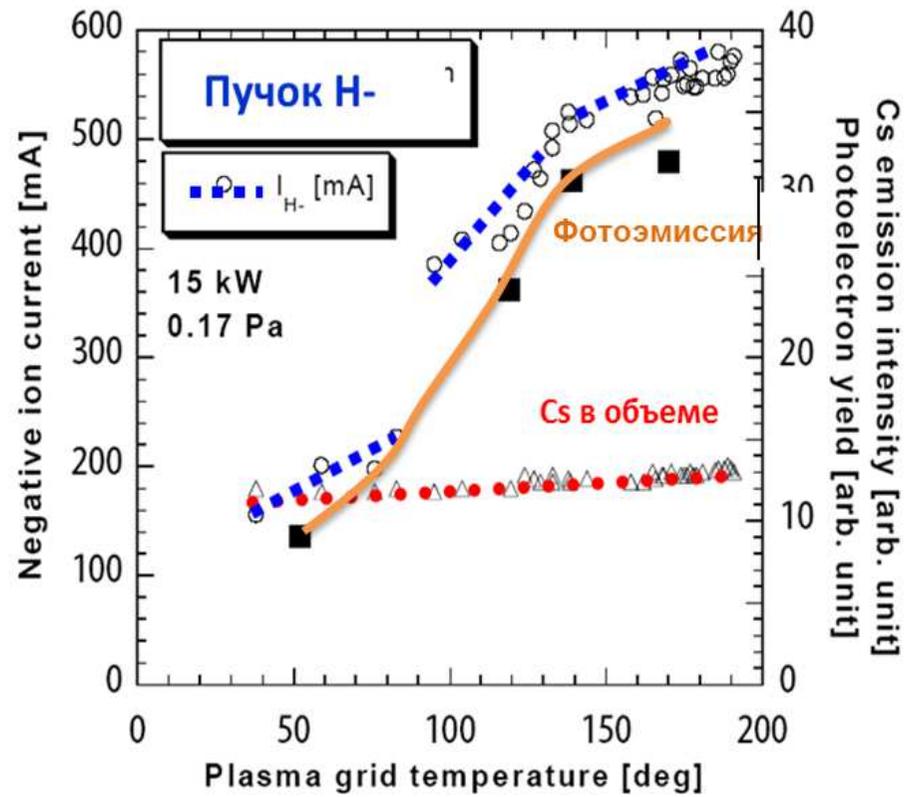
# Как поддерживать оптимальное покрытие



Коэффициент прилипания Cs на W при заполнении цезиевого покрытия

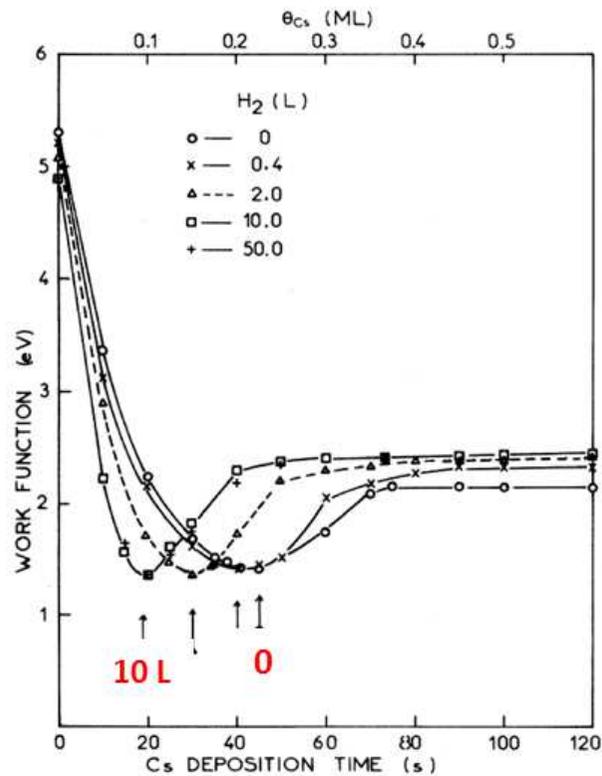


Покрытие  $\theta \sim 1$  поддерживается в широком диапазоне температур и потоков цезия (Taylor & Langmuir, 1933)

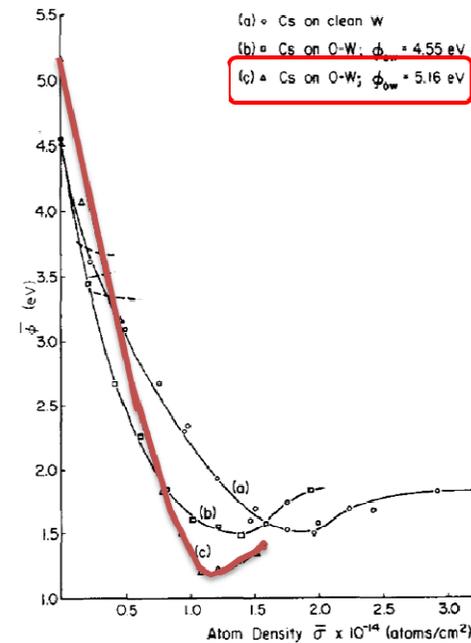


Оптимизация цезиевого покрытия и рост анодной генерации ионов H- при нагреве PG

# Влияние водорода и кислорода на оптимальное покрытие цезием



Внедрение **H<sub>2</sub>** в слой Mo-Cs сдвигает минимум работы выхода в область меньших покрытий



Покрyтие Cs на **окисленном** вольфраме понижает работу выхода до  $\phi = 1.1$  эВ при меньшей плотности атомов Cs  **$\sim 10^{14}$  ат/см<sup>2</sup>**

Образование гидроксидной пленки CsOH приводит к отравлению Cs покрытия и повышению работы выхода

# Можно ли поддерживать оптимальное покрытие цезием в условиях разряда?

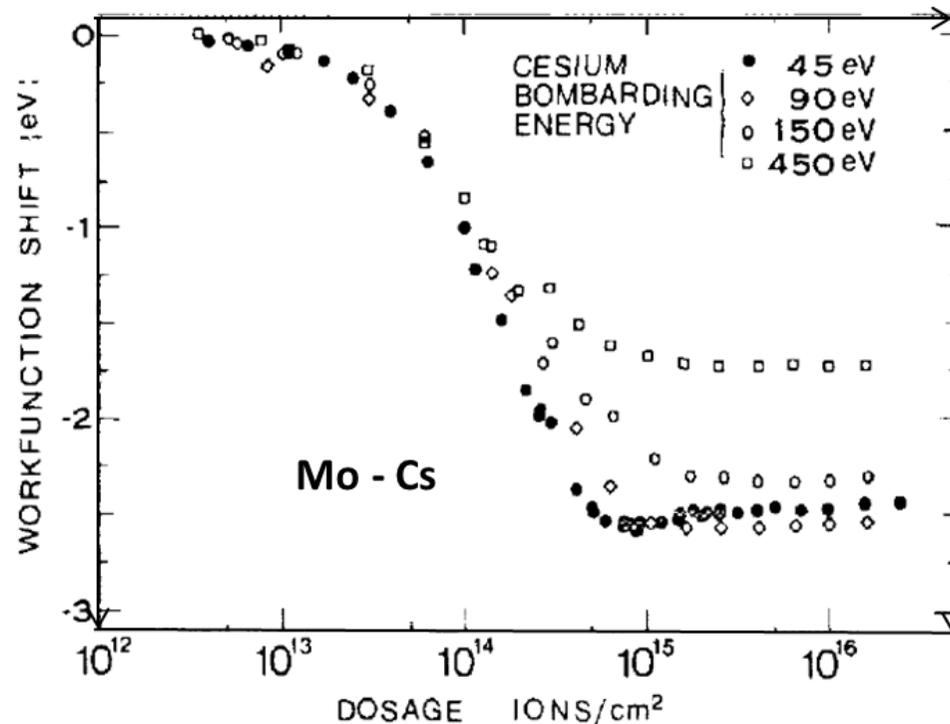


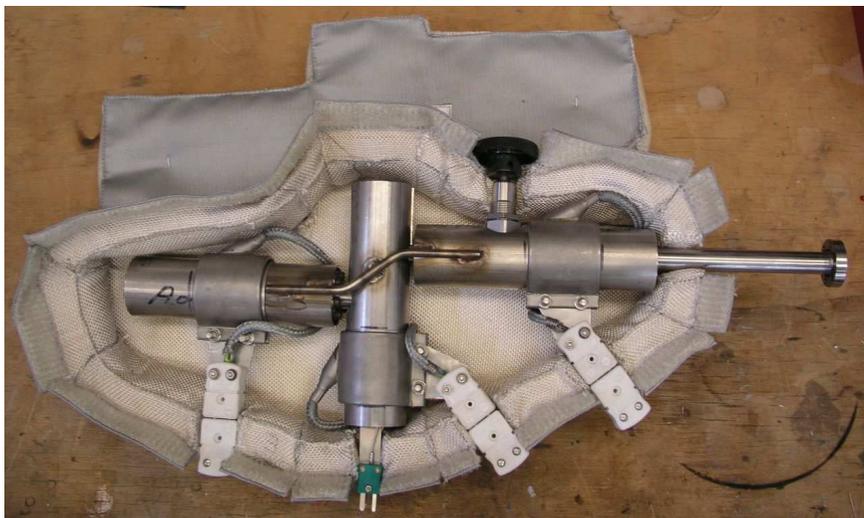
FIG. 1. Work-function shift as a function of the positive cesium ion dosage.

**Ионы Cs<sup>+</sup> низкой энергии 8-150 эВ захватываются поверхностью молибдена и снижают работу выхода на 2.5 эВ**

# Подача Cs из ампул с металлическим цезием



Glove box



Система подачи Cs – CEA, Cadarache



Управляемый  
вентиль

Паропровод

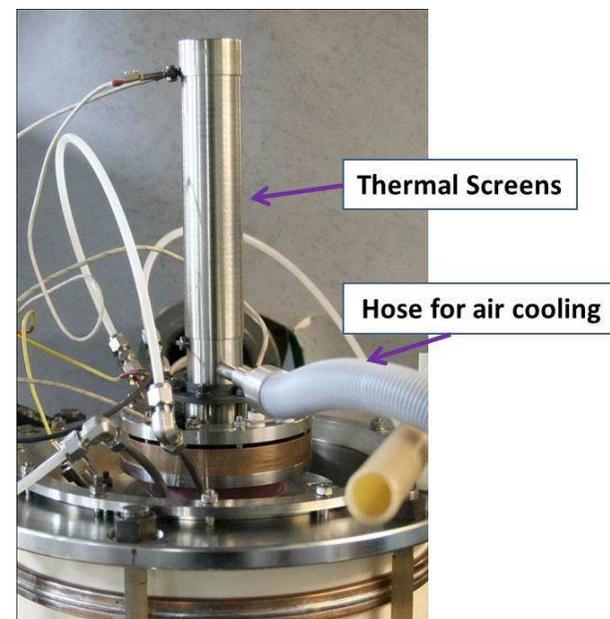
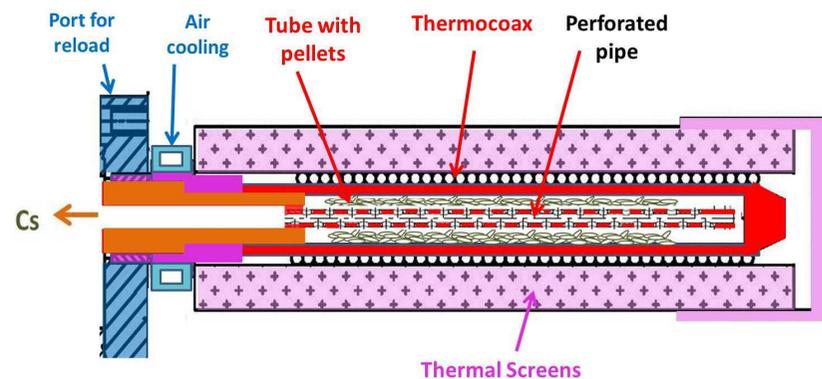
Затвор

Цезиевая печь

Система подачи Cs - NIFS

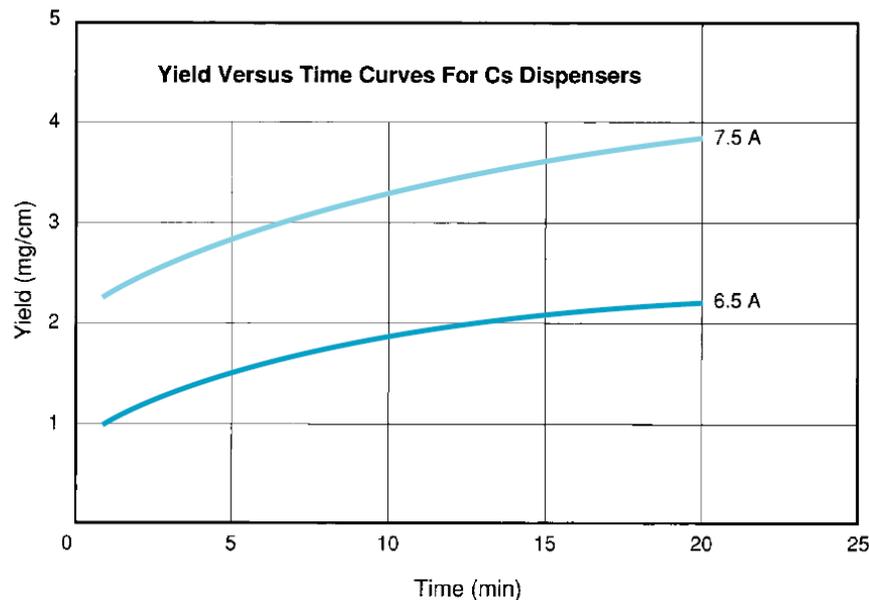
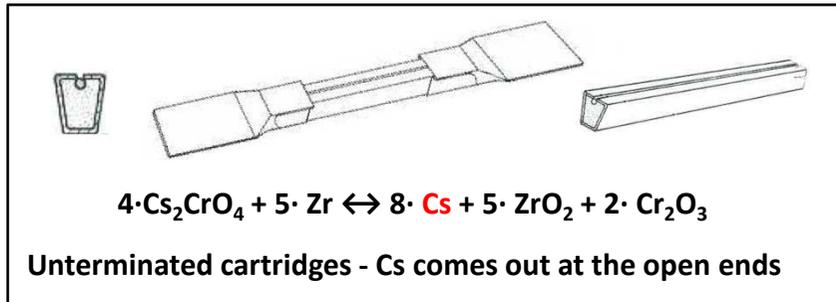
Количество цезия	6 г
Температура печи	170-200 °C
Давление пара	1,5 - 10 Па
Периодичность заправки	Через $\sim 10^4$ импульсов

# Безопасная система подачи цезия из таблеток хромата цезия+ титан (ИЯФ)



# Безопасная система подачи цезия из диспенсеров с хроматом цезия + Zr-Al

Dispensers with Cesium Chromate + St101 getter - made by SAES



Heating to temperature 550-800 °C

Используются в ППИ с анодной генерацией ионов (SNS)

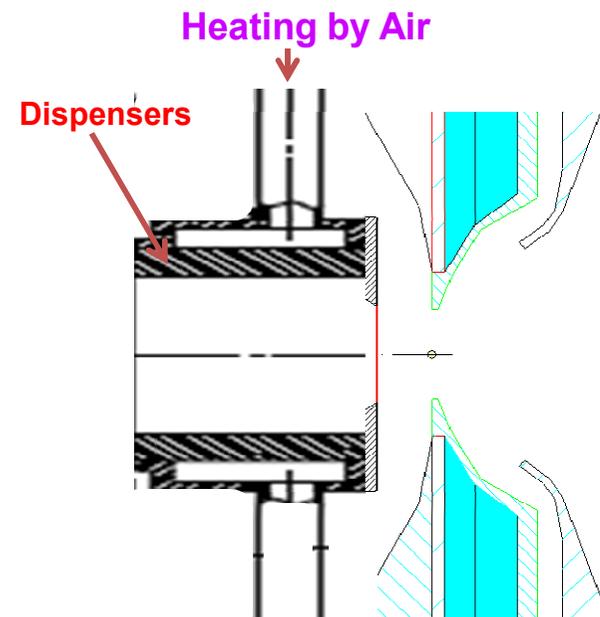
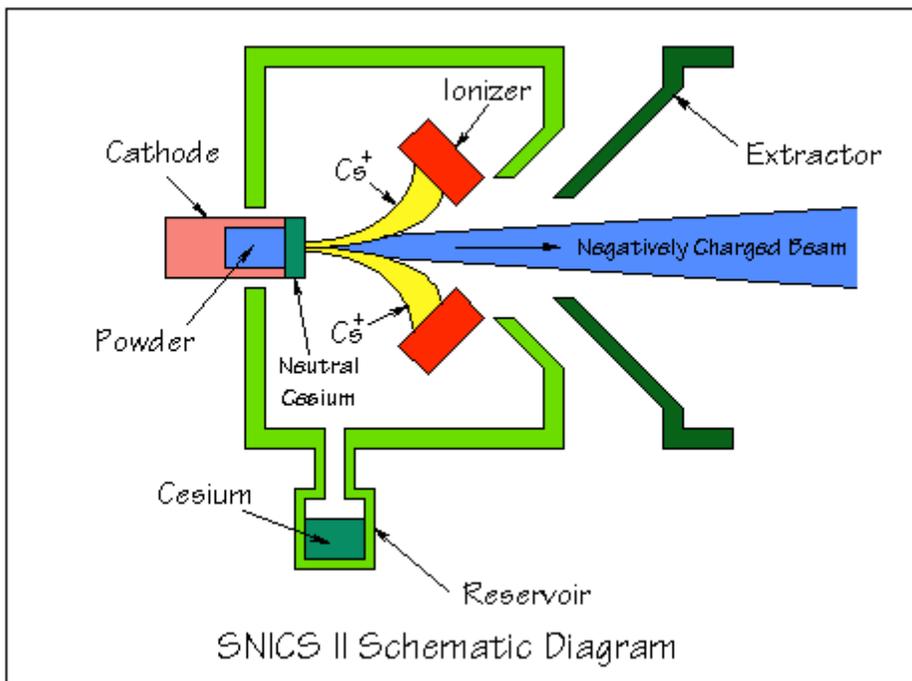


Схема подачи Cs в Н- источник SNS

# Распылительные источники ОИ

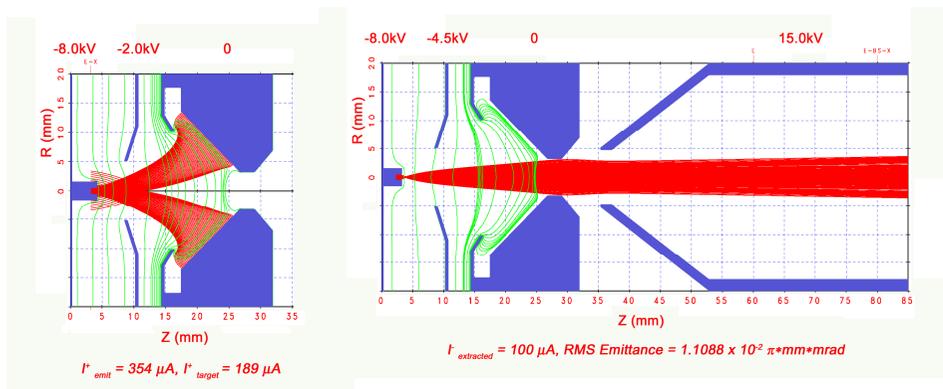
распыление ОИ ускоренными ионами из образца, покрытого цезием



Ионизатор в источнике для АМС

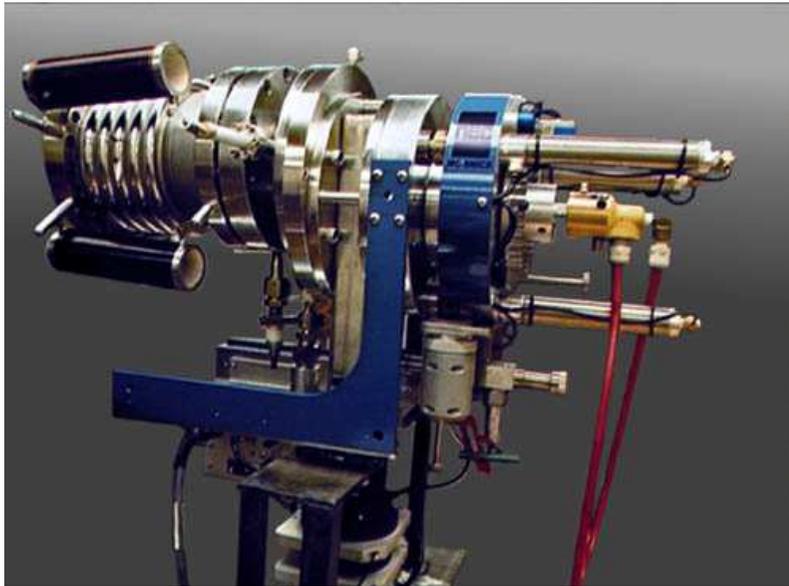
## Параметры источника АМС в LLNL, Ливермор

Extraction voltage	40 kV
Cathode voltage	10–11 kV
Ionizer power	135 W
Cs reservoir temperature	Approximately 150°C
Cathode currents	3–4 mA
Cs spot diameter	0.6–1.2 mm
Outputs	200–250 $\mu\text{A C}^-$
Efficiency (C to $\text{C}^-$ )	4–10%
Emittance (approx.)	40 $\pi$ mm-mrad

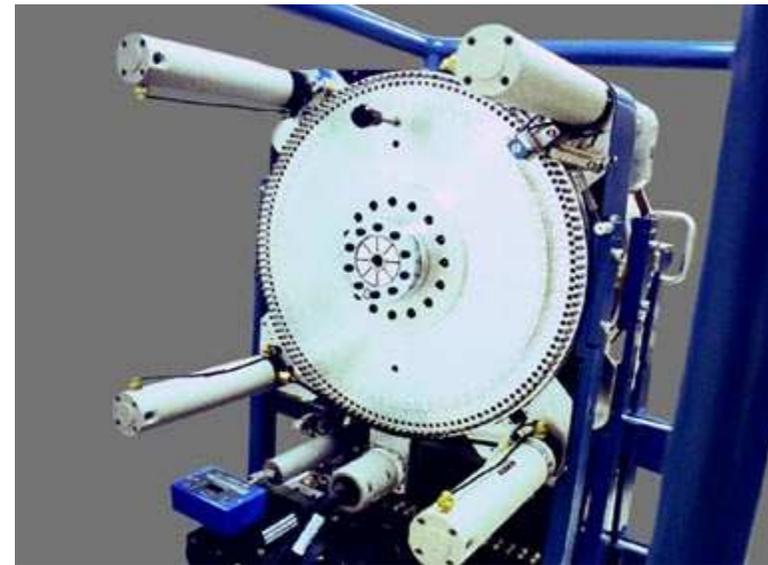


# Коммерческие распылительные источники ОИ

National Electrostatics Corporation-  
Source of Negative Ions by Cesium Sputtering - SNICS II



$\text{Cu}^- = 150 \mu\text{A}$   
 $\text{C}^- = 300 \mu\text{A}$



*multi-cathode SNICS source has 134 sample positions.*

**Сделано > 80 источников NEC**